Elektrostriktion in Gasen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der Hohen Philosophischen Fakultät
der Universität Marburg

vorgelegt von

Werner Kliefoth
aus Hamburg

MARBURG 1926

Von der Philosophischen Fakultät der Universität Marburg
angenommen am 15. Juli 1926.

Berichterstatter: Herr Prof. Dr. Clemens Schaefer

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Juli 1926.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderabdruck aus: Zeitschrift f. Physik, Bd. 39 (1926).

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554602_0009

Elektrostriktion in Gasen.

Von **Werner Kliefoth** in Marburg (Lahn).

Mit 8 Abbildungen. (Eingegangen am 6. August 1926.)

Es handelt sich um einen experimentellen Beitrag zur Frage nach der Elektrostriktion in Gasen. Der Elektrostriktionseffekt wird nachgewiesen an den Dipolgasen CO_2 und SO_2, ferner an Luft, O_2 und N_2. Bei CO_2 und SO_2 wird ein endlicher Wert für das elektrische Moment gefunden, während sich für Luft, O_2 und N_2 kein von Null verschiedener Wert für das Moment ergibt. Ferner wird eine erhebliche Abweichung des Experiments von der Gansschen bzw. der Debye-Frivoldschen Theorie beobachtet für Spannungswerte über 15000 Volt; diese wird zurückgeführt auf eine Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante vom elektrischen Felde.

Einleitung. Schon wiederholt ist experimentell wie theoretisch untersucht worden, ob Gase beim Anlegen eines elektrischen Feldes eine Druckänderung bei gleichem Volumen bzw. eine Volumenkontraktion bei gleichem Druck erfahren. Die erste experimentelle Untersuchung der Elektrostriktion von Gasen stammt von Quincke[1]); Luft zeigte keine Druckänderung, auch bei Kohlendioxyd konnte mit Sicherheit kein Ergebnis festgestellt werden. Durch Verbesserung der Quinckeschen Anordnung ist es zwar Gans[2]) gelungen, den Elektrostriktionseffekt an Gasen festzustellen (bei Kohlendioxyd und bei Luft), aber seine Messungen sind nur qualitativer Natur. Auch theoretisch hat Gans die Frage behandelt; er findet auf Grund der Maxwellschen Theorie für die Volumenänderung eines Gases durch dielektrische Polarisation:

$$\left|\frac{\Delta v}{v_0}\right| = \frac{\varepsilon - 1}{8\pi p} \cdot \mathfrak{E}^2,$$

wenn $\mathfrak{E}$ die Feldstärke eines homogenen Feldes, ε die Dielektrizitätskonstante und p den Druck bedeuten. Diese Formel hat früher schon Lippmann[3]) mittels des Energieprinzips erhalten. Auch Pockels[4]) hatte sie gefunden. Bos[5]) und Drude[6]) haben sich indessen gegen die Lippmannsche Ableitung gewandt; Drude sucht zu zeigen, daß auf Grund der thermodynamischen Hauptsätze und der Maxwellschen Theorie das Volumen eines Gases von der elektrischen Feldstärke unab-

[1]) G. Quincke, Wied. Ann. **10**, 529, 1880.
[2]) R. Gans, Ann. d. Phys. **11**, 797, 1903.
[3]) G. Lippmann, Ann. chim. phys. (5) **24**, 145, 1881.
[4]) F. Pockels, Grunerts Arch. (2) **12**, 57, 1894.
[5]) D. Bos, Groninger Ing.-Diss. 1888.
[6]) P. Drude, Physik des Äthers, S. 301, 1. Aufl., 1894.

hängig ist. Dies war der Anlaß für die Gans schen Untersuchungen, die rein formal von den Ansätzen der Maxwell schen Theorie ausgehen. Es gelang ihm in der Tat zu zeigen, daß bei Drude und Bos nicht alle Energieumsetzungen berücksichtigt worden sind und daß sich so ihr abweichendes Ergebnis erklärt.

Frivold[1]) hat auf Grund der Debye schen Vorstellung, daß die Moleküle polarisierbare Systeme elektrischer Ladungen sind, eine molekulartheoretische Deutung des Elektrostriktionseffektes gegeben. Debye[2]) führt bekanntlich die gegenseitige Anziehung der Moleküle auf elektrischen Ursprung zurück; durch die elektrischen Felder zwischen den Molekülen kommt neben dem äußeren Druck noch ein „innerer" zustande. Bringt man nun das Gas in ein äußeres elektrisches Feld, so wird dadurch der „innere" Druck um einen wenn auch nur geringen Betrag vermehrt. Dieser bedingt dann eben die als Elektrostriktion bezeichnete Volumenkontraktion. Frivold berechnet die Elektrostriktion im besonderen für Dipolgase und kann dann bei gemessener Volumenkontraktion das elektrische Moment dieser Dipole berechnen. Auf diese Weise hat er das Moment von Schwefeldioxyd und in einer späteren Arbeit[3]) das von Salzsäuregas (H Cl) bestimmt. Die von ihm abgeleitete Formel für die Volumenänderung lautet:

$$\left|\frac{\Delta v}{v_0}\right| = \frac{1}{2}(\alpha + \beta)\cdot\frac{\mathfrak{E}^2}{k\,.\,T}; \quad \text{dabei ist} \quad \beta = \frac{\mu^2}{3\,kT}.$$

v_0 ist das ursprüngliche Volumen, α eine Konstante, die aus der Molekularrefraktion berechnet werden kann, k die Boltzmann sche Konstante, T die absolute Temperatur und μ das elektrische Moment.

In experimenteller Hinsicht stellt die Frivold sche Anordnung einen großen Fortschritt dar gegenüber den Anordnungen von Quincke und Gans, da es ihm hierdurch möglich war, wirklich quantitative Messungen auszuführen.

Vorliegende Untersuchung soll einen weiteren experimentellen Beitrag liefern für die Elektrostriktion in Gasen. Zunächst ist CO_2 untersucht und daraus das elektrische Moment bestimmt worden; außerdem wurden Gase untersucht, die keine „fertigen" Dipole besitzen, Luft, Sauerstoff, Stickstoff; endlich ist zum Vergleich mit den Frivold schen Ergebnissen SO_2 gemessen worden. Um bei den hier untersuchten Gasen einen merkbaren und meßbaren Effekt zu bekommen, war wesentlich, daß erheb-

[1]) O. E. Frivold, Phys. ZS. **22**, 603, 1921.
[2]) P. Debye, Phys. ZS. **21**, 178, 1920.
[3]) O. E. Frivold, ebenda **24**, 82, 1923.

lich höhere Spannungen an die Gase gelegt wurden, bis über 30 000 Volt, d. h. bis zum drei- und vierfachen Betrag, als dies bei SO_2 und HCl nötig ist.

Versuchsanordnung.

Die Hauptschwierigkeiten der experimentellen Untersuchung bestehen in der Messung der sehr kleinen Volumenänderung des Gases, deren Ermittlung noch durch den großen Temperaturkoeffizienten der Gase erschwert wird, und ferner in der Erzeugung eines konstanten elektrischen Feldes im Kondensator.

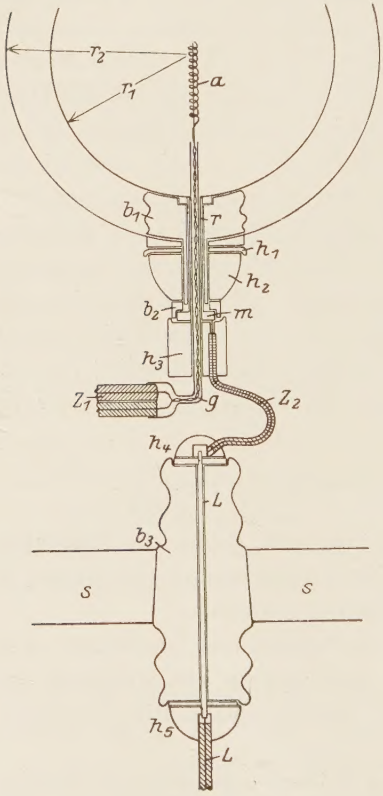

Fig. 1.

Kondensator. Es wurde ein Kugelkondensator aus zwei konzentrischen Kugeln von 7,5 und 10 cm Radius verwendet. Die äußere Kugel war auseinandernehmbar; die Ränder der Halbkugeln waren umgebogen und durch aufgelötete Metallringe verstärkt. Die Dichtung geschah mittels Wachskitt. Die innere Kugel wurde aufgeladen; sie hing an einem in die Kugel eingeschraubten Messingrohr r (s. Fig. 1). Dieses wurde isoliert durch die geerdete äußere Kugel hindurchgeführt. Als Isolation diente das Bernsteinstück [1]) b_1, das den Zwischenraum zwischen den beiden Kugeln des Kondensators an der Spannungsdurchführung ausfüllt und noch durch die äußere Kugel hindurch einen Ansatz von 40 mm besitzt, um das Messingrohr r zu isolieren. b_1 wurde aus einem Stück gedreht. Anfänglich verwendetes Hartgummi bewährte sich an dieser Stelle für hohe Spannungen nicht. Um den Bernsteinansatz herum befand sich noch ein Hartgummischutz (h_1 und h_2) und ein kleiner Bernsteinring (b_2),

[1]) Es wurde Preßbernstein verwendet, wie er von den staatlichen Bernsteinwerken in Königsberg geliefert wird. Er hat sich ausgezeichnet bewährt und läßt sich auch gut bearbeiten. Poliert wurde mit feinem Sandpapier und Öl, dann mit Wiener Kalk, Spiritus und einem Lederlappen.

in dem die an das Messingrohr r angelötete Mutter m lag, durch die man die innere Kugel festschrauben konnte. Zur Dichtung des inneren Kondensatorraumes gegen den Außenraum benutzte man Leder- oder Gummischeiben, die zwischen die einzelnen Isolationsstücke gelegt werden.

Außer auf diese isolierte Durchführung mußte sorgfältig darauf geachtet werden, daß der Kondensator kein Sprühen oder Ausstrahlen zeigt. Dadurch wird eine gewisse Temperaturänderung bzw. eine Art elektrischer Wind erzeugt, die jeden Elektrostriktionseffekt überdecken. Die Kugeln sind im Innern auf Hochglanz poliert. Sehr wichtig ist, daß beim Zusammensetzen der Kugeln kein Staubteilchen in den Kondensator kommt, das Anlaß zum Sprühen geben kann. Waren aber diese Voraussetzungen erfüllt, so gelang es, zwischen den Kondensatorkugeln ein konstantes Feld von 40 000 Volt zu erzeugen, ohne daß eine Spur von Ausstrahlung festzustellen war.

Manometer. Zur Messung der kleinen Volumenänderungen von der Größenordnung 10^{-4} bis $10^{-5}\,\mathrm{cm}^3$ fand ein Manometer Verwendung, das auf demselben Prinzip beruht wie das Frivoldsche. Tabaksrauch dient als Manometersubstanz.

Um Messungen ausführen zu können, war es notwendig, den Kondensator von der Atmosphäre zu isolieren, da sich sonst jede kleine Druckschwankung in dem sehr empfindlichen Manometer bemerkbar machen würde. Deshalb befand sich der Kondensator in einem sogenannten Schutzgefäß; während der Messung waren Kondensator–Schutzgefäß nur durch das Manometer verbunden. Durch diese Anordnung wird das Mikromanometer allerdings unempfindlicher; denn es tritt im Schutzgefäß beim Anlegen der Spannung an den Kondensator eine Druckänderung ein, wodurch die Empfindlichkeit des Manometers und damit die Verschiebung der Rauchteilchen verringert wird.

Diese Verkleinerung des Effektes wird aber um so weniger merkbar, je größer das Schutzgefäß ist. Ist v_1 das Volumen des Kondensators und v_2 das des Schutzgefäßes, so ist der Verkleinerungsfaktor $= \dfrac{v_2}{v_1 + v_2}$; er betrug 0,94.

Das Manometer (s. Fig. 2) besteht aus einem massiven Messingklotz m, in den von zwei gegenüberliegenden Seiten schräg nach oben führend je ein sich verengender Kanal (k_1 und k_2) gebohrt ist. Die beiden Enden der Kanäle münden in die Kapillare mit rechteckigem Querschnitt, deren Grundfläche von dem Metallklotz gebildet wird; die beiden Seitenflächen werden durch die Seitenflächen zweier Glasplatten (g_1 und g_2) gebildet,

die mit der übrigen Metalloberfläche zusammen plan geschliffen sind, so daß also die Kapillare auch seitlich beleuchtet werden kann. Die obere Seite wird durch einen Objektträger *o*, der zur Reinigung des Manometers abgenommen werden konnte, abgeschlossen. Gedichtet wird mit gewöhnlichem Hahnfett.

Um die Rauchpartikeln sichtbar zu machen, wurde die Manometerkapillare durch die Seitenfläche der einen Glasplatte beleuchtet und durch den Objektträger hindurch mittels eines Mikroskops beobachtet. Bei bekanntem Querschnitt der Manometerkapillare kann man aus der Zahl der Skalenteile, um die die Rauchteilchen im Mikroskop verschoben sind, die Volumenänderung berechnen.

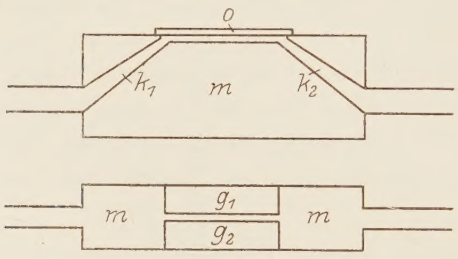

Fig. 2.

Die Größe der Kapillare ist so gewählt, daß sich bei den untersuchten Gasen eine meßbare Verschiebung der Rauchteilchen wahrnehmen läßt.

Temperaturgleichgewicht. Vorbedingung für das quantitative Messen des Elektrostriktionseffektes mit dem Mikromanometer ist absolutes Stillstehen der Rauchpartikeln in der Kapillare bei nicht angelegtem Feld. Diese Bedingung ist ohne guten Wärmeschutz unmöglich zu erfüllen. Zu diesem Zweck dienten drei ineinanderstehende große Gefäße aus verzinktem Eisenblech. In das innerste wurde das Schutzgefäß mit dem Kondensator hineingestellt; in den beiden äußeren befand sich Wasser, das mittels einer Pumpe umgerührt werden konnte; oben war das Schutzgefäß von Watte umgeben; um Wärmeleitung zu vermeiden, wurden die Metallhähne des Manometers mit Holzschlüsseln versehen. Auch das Manometer war innerhalb desselben Wärmeschutzes. In den Wasserbehältern befand sich in der Höhe des Manometers eine Öffnung, in der das Mikroskop zum Beobachten stand; die überflüssigen Öffnungen waren mit Watte verstopft. Die gesamte Apparatur stand außerdem noch in einem Zimmer, das keine Außenwände hatte, so daß die Temperatur immer ziemlich konstant auf etwa 290° absolut gehalten werden konnte. Trotz aller dieser Vorsichtsmaßregeln war oft noch ein leises Strömen der Rauchpartikeln wahrzunehmen. Um die Strömung in der Richtung vom Kondensator in das Schutzgefäß zu beseitigen, wurde ein Heizdraht um das Schutzgefäß gelegt. Zur Kompensation des Wärmestromes in der Effektrichtung, d. h. also vom Schutzgefäß in den Kondensator,

mußte eine Heizspirale a (Fig. 1) in das Innere der inneren Kondensatorkugel eingeführt werden. Die experimentelle Schwierigkeit liegt darin, den Heizdraht isoliert durch die auf Hochspannung befindliche innere Kugel zu bringen. Trotz Isolation lud sich der Heizdraht durch Influenz teilweise mit auf; deshalb wurde die als Heizbatterie dienende Taschenlampenbatterie nebst Zuleitung auch isoliert. Die Batterie wurde in Paraffin eingegossen und in ein Gefäß mit reinem, wasserfreiem Paraffinöl gestellt, in dem sich auch ein kleiner Quecksilberschalter befand zum Ein- und Ausschalten des Heizstromes. Die Zuleitungen bestanden aus gut isoliertem Zündkerzenkabel (z_1). Diese Kabel gehen in einem am Ende erweiterten Glasohr g (Fig. 1) in zwei dünne Drähte über. Zum Schutz der Drähte führt das Glasrohr g durch das Messingrohr r in das Innere der Kugel. Die Hochspannungsleitung L, die durch den Deckel des Schutzgefäßes s hindurch durch Bernstein (b_3: 13 cm lang und 3,5 cm Durchmesser) isoliert ist, umgeht die Leitung des Heizdrahtes in der aus der Fig. 1 ersichtlichen Weise durch das Hochspannungskabel z_2, das durch einen Steckkontakt leitend mit der Mutter m des Messingrohres r verbunden ist. Die Isolierung geschieht hier durch die Hartgummihülle h_3.

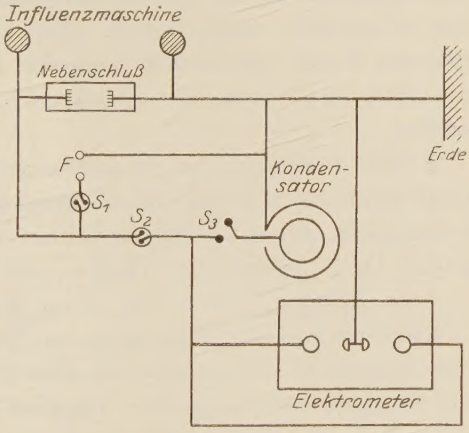

Fig. 3.

Auf diese Weise war es möglich, schwache Temperaturströmungen zu kompensieren.

Elektrische Anordnung. Die elektrische Anordnung geht aus der Schaltungsskizze (Fig. 3) hervor. Zur Erzeugung der Hochspannung dient eine 20plattige Toeplersche Influenzmaschine. Die Spannung wird reguliert und konstant gehalten durch einen Spitzennebenschluß. Er besteht aus einem geschlossenen Glasrohr, in dem feine Platinspitzen gegeneinander verschoben werden können und so die Spannung vom höchstmöglichen Wert an durch Zusammenschieben der Spitzen beliebig verkleinert werden kann. Die Hochspannungsleitung ist in Glasröhren mit Paraffin eingegossen; um Berührungen des Drahtes mit der Glaswand zu vermeiden, wurden über den Leitungsdraht in gewissen Abständen

Glasperlen geschoben. An den Verbindungs- und Abzweigungsstellen wurde das Sprühen dadurch verhindert, daß die zusammengelöteten Drahtenden zusammen mit den Enden der Glasröhren in auseinandernehmbare durchbohrte Hartgummiklötze gelegt wurden. Die Hartgummiklötze konnten mit Schrauben aus einem Isolationsmaterial, Galalit, zusammengeschraubt und dann mit Paraffin ausgegossen werden. Auf diese Weise ergaben sich einwandfreie Verbindungen der Hochspannungsleitung. Die Schalter S_1 und S_2 sind Ölschalter. Für das dauernde Ein- und Ausschalten des Kondensators bewährte sich am besten ein Schalter in Luft S_3, bei dem die unterbrochenen Enden der Leitung durch 2-cm-Messingkugeln gebildet wurden; die Kugeln waren auf einem Stift, der im Glasrohr eingekittet, aufgeschraubt. Zur besseren Isolation befand sich zwischen Kugel und Glasrohr noch ein Bernsteinring. Die eine Kugel steht fest und die andere ist beweglich und kann die Leitung unterbrechen.

Diese Vorsichtsmaßregeln gestatteten ein einwandfreies Messen der Elektrostriktion auch bei höheren Spannungen; bis zu 40000 Volt hin trat nirgends, auch in der äußeren Leitung nicht, ein merklicher Spannungsverlust durch Sprühen oder Ableitung ein.

Die Spannung wurde mit einem Hochspannungselektrometer nach C. Müller[1]) gemessen; das Instrument erhielt jedoch statt des Zeigers einen Spiegel, so daß objektiv auf einer durchsichtigen Skale aus Celluloid abgelesen werden konnte. Die Skale war fest mit dem Instrument verbunden. Die Eichung des Elektrometers geschah für niedere Werte (bis 15000 Volt) mit einem geeichten Voltmeter, für die höheren Spannungen mit einer parallel geschalteten Funkenstrecke F mit 5-cm-Kugeln; die Funkenstrecke war der bei C. Müller angegebenen nachgebildet.

Darstellung der Gase. Sämtliche untersuchten Gase wurden, Luft ausgenommen, den im Handel befindlichen Bomben entnommen. Die größte Sorgfalt wurde auf das Trocknen der Gase verwandt. Spuren von Feuchtigkeit konnten die Isolationsfähigkeit des Kondensators merklich herabsetzen und zum Teil sogar ein Messen des Effektes verhindern. CO_2 wurde zunächst vorgetrocknet mit Phosphorpentoxyd und dann durch U-Rohre, die in zwei Dewarsche Gefäße mit einer Kältemischung aus fester Kohlensäure und Äther eintauchten, stundenlang langsam durch den

[1]) C. Müller, Ann. d. Phys. **28**, 585, 1909. — Das Instrument wurde von dem Mechaniker Schwarz des Berliner Physikalischen Instituts gebaut. Herrn Prof. Ladenburg bin ich für Bemühungen um das Instrument zu Dank verpflichtet.

Kondensator und das Schutzgefäß geleitet. Luft und Stickstoff strömten durch flüssige Luft und Sauerstoff ebenso wie CO_2 durch eine Kältemischung von Kohlensäure und Ätherschnee. SO_2 wurde auch einer Bombe entnommen und mehrfach mittels konzentrierter Schwefelsäure getrocknet.

Ergebnisse.

A. Kohlendioxyd. Die Messungsergebnisse sind in Fig. 4 dargestellt. Die Abszissen stellen das Quadrat der Spannung in CGS-Einheiten dar und die Ordinaten die Verschiebungen der Rauchteilchen in der Kapillare, ausgedrückt durch die Zahl der Skalenteile im Okularmikrometer. Die Streuung der Werte ist sehr stark; das ist an sich nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, daß die gemessenen Werte Ver-

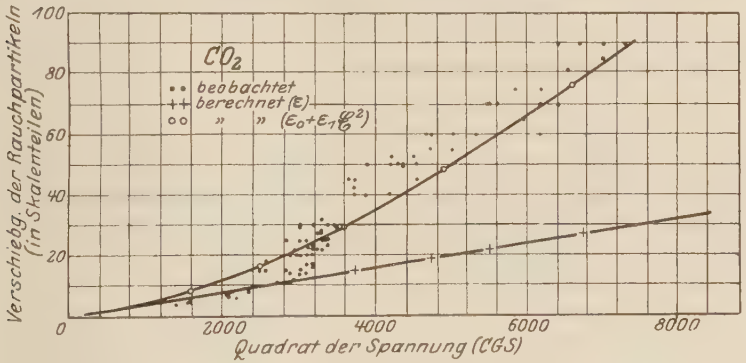

Fig. 4.

schiebungen von Rauchteilchen darstellen. Die Messungen sind natürlich immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, da nur in wenigen Fällen ein völliger Rückgang der Rauchteilchen in ihre Anfangslage nach Abschaltung der Spannung und Erdung des Kondensators stattfindet. Die geringste Strömung kann das natürlich verhindern. Ferner weiß man nie, ob die Rauchteilchen nicht, wenn sie durch die Volumenkontraktion ins Strömen gekommen sind, noch ein Stück weiter laufen. Es kann auch vorkommen, daß die Teilchen plötzlich einen Gang in entgegengesetzter Richtung aufnehmen. Alle diese Faktoren, die man nicht oder doch erst nach längerer Übung übersehen kann, beeinträchtigen offenbar die Genauigkeit der Messungen und daher sind eben auch die starken Streuungen der Werte zu erklären. Es muß deshalb eine größere Zahl von Messungen gemacht werden. Trotz dieser Fehlermöglichkeiten sieht man doch ganz deutlich, daß die Werte um eine bestimmte Lage herum

schwanken. Die aufgezeichneten Punkte stammen aus verschiedenen Meßreihen, und zwar ist nicht nur das Gas wiederholt neu in den Kondensator eingeleitet worden, sondern es mußte wegen Störungen der Kondensator zweimal auseinandergenommen werden.

Wenn man nun nach der Ganssschen oder nach der ihr äquivalenten Debye-Frivoldschen Theorie die zu bestimmten Feldstärken gehörige Volumenkontraktion ausrechnet, so ergibt sich ganz deutlich eine erhebliche Abweichung von den gemessenen Werten. Die theoretisch berechneten Werte werden durch die ausgezogene Gerade (Fig. 4) wiedergegeben. Die Abweichung setzt aber erst bei höheren Spannungen ein, bei etwa 12000 Volt, und erreicht bei höheren Spannungen den drei- bis vierfachen Wert des theoretisch errechneten Betrages.

Man kann diese Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment beseitigen, wenn man die Dielektrizitätskonstante ε als vom jeweiligen elektrischen Feld abhängig ansieht und statt ε in die Ganssche Ableitung einführt:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cdot \mathfrak{E}^2.$$

Man muß das Quadrat der Feldstärke ansetzen, da ε sonst ja von der Feldrichtung abhängig wäre. Dieser Ansatz für die Dielektrizitätskonstante ist also in die Ganssche Theorie einzuführen. Die Durchrechnung ergibt dann für die Volumenänderung:

$$\left|\frac{\Delta v}{v_0}\right| = \frac{\varepsilon_0 - 1}{8\pi p} \cdot \mathfrak{E}^2 + \frac{3\varepsilon_1}{16\pi \cdot p} \cdot \mathfrak{E}^4.$$

Für einen Kugelkondensator mit den Radien r_1 und r_2 ergibt sich für die elektrische Feldstärke:

$$\mathfrak{E} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_2 - r_1} \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r^2},$$

wobei $\varphi_1 - \varphi_2$ die Potentialdifferenz bedeutet; setzt man diesen Wert von $\mathfrak{E}$ in obige Gleichung ein, so erhält man durch Integration zwischen den Grenzen r_1 und r_2 für die Gesamtvolumenänderung:

$$|\Delta v| = \frac{\varepsilon - 1}{2p} \cdot \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{r_2 - r_1} \cdot r_1 \cdot r_2 + \frac{3\varepsilon_1}{20p} \cdot \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)^4}{(r_2 - r_1)^4} \cdot \frac{r_2^5 - r_1^5}{r_1 \cdot r_2}.$$

Der Wert des Korrektionsfaktors ist auf folgende Weise ermittelt worden: es wurden Mittelwerte gebildet aus den Beobachtungen, die zu gleichen Spannungswerten gehören und hieraus die zu diesen Werten gehörigen ε_1-Werte errechnet. Mit dem aus diesen einzelnen ε_1-Werten gebildeten Mittelwert — er ergibt sich zu $\varepsilon_1 = 1{,}60 \cdot 10^{-6}$ — wurde die zweite theoretische Kurve (Fig. 4) berechnet. Sie ergibt eine innerhalb der

Fehlergrenze liegende Übereinstimmung mit den Beobachtungswerten; nur bei den ganz niedrigen Spannungswerten hat das Zusatzglied einen etwas zu großen Einfluß.

Die kleinen Werte stimmen überein mit den nach der Gansschen und Frivoldschen Theorie errechneten Werten; man kann sie also benutzen, um das elektrische Moment zu berechnen. Die kleinen Rauchteilchenverschiebungen sind verhältnismäßig sicher; auf ihre Ermittlung wurde eine große Mühe verwandt. Gemessen wurde nur bei völligem Stillstehen der Rauchteilchen; ferner fand bei diesen Messungen nach Ablegung der Spannung ein Rückkehren der Rauchpartikeln in ihre Ausgangslage statt. Rechnet man aus diesen Werten nach der Frivoldschen Formel das elektrische Moment von CO_2 aus, so ergibt sich als Mittelwert $\mu = 0{,}20 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{cm^{5/2} \cdot g^{1/2} \cdot sec^{-1}}$. Als Fehlergrenze ist ein Wert von etwa $\pm 0{,}05 \cdot 10^{-18}$ anzusetzen. Systematische Abweichungen nach größeren Werten finden von ungefähr 14000 Volt statt.

Der oben angegebene Wert stimmt gut mit dem von Weigt[1]) nach einer ganz anderen Methode gefundenen überein, er fand $\mu = 0{,}142 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{cm^{5/2} \cdot g^{1/2} \cdot sec^{-1}} \pm 0{,}0017 \cdot 10^{-18}$[2]). Zu bedenken ist, daß die Fehlergrenze bei den Messungen des Elektrostriktionseffektes doch verhältnismäßig groß ist; andererseits aber doch nicht so groß, als daß nicht mit Sicherheit auf ein endliches elektrisches Moment bei CO_2 geschlossen werden könnte.

B. Schwefeldioxyd. Versuche mit SO_2 sollten feststellen, ob die Messungen mit den Frivoldschen übereinstimmen. Da ferner bei SO_2 die Volumenänderung bei angelegtem Feld verhältnismäßig größer ist als bei CO_2, konnte nicht mit so hohen Spannungen gearbeitet werden, da sonst der Meßbereich des Manometers überschritten worden wäre. Nach Frivolds Ergebnissen und dem Resultat bei CO_2, nachdem sich bei niederen Spannungen keine Abweichung von dem theoretischen Wert ergab, war zu vermuten, daß bei diesen niederen Spannungen kein Unterschied zwischen Experiment und Theorie auftreten würde.

Fig. 5 bestätigt diese Vermutung. Die gemessenen Werte gruppieren sich um die theoretische Kurve; allerdings deuten die bei höheren Spannungswerten ausgeführten Messungen doch schon auf eine systematische Abweichung nach größeren Werten hin. Da der Meßbereich des

[1]) H. Weigt, Phys. ZS. **22**, 643, 1921.

[2]) Wie Herr Prof. Waetzmann mir freundlicher Weise mitteilt, ist im Breslauer physikalischen Institut das Moment von CO_2 von Herrn v. Braunmühl zu $0{,}14 \cdot 10^{-18}$ bestimmt worden.

Manometers nur 100 Skalenteile umfaßt, sind die eingetragenen großen Werte eigentlich nur als unterer Grenzwert der Rauchteilchenverschiebung anzusehen. Zu bemerken ist noch, daß auch schon Frivold bei seinen Messungen an SO_2 (bis zu Spannungswerten von 11 000 Volt) zu einem um 12,5 Proz. zu großen Mittelwert kommt im Vergleich zu dem aus seiner Theorie berechneten. Er glaubt diese Abweichung durch Versuchs-

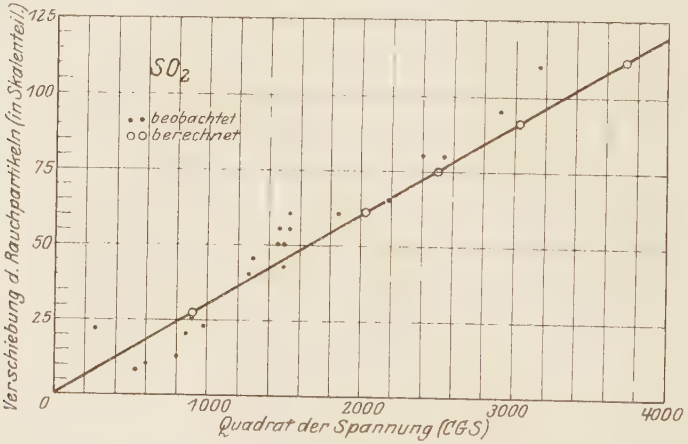

Fig. 5.

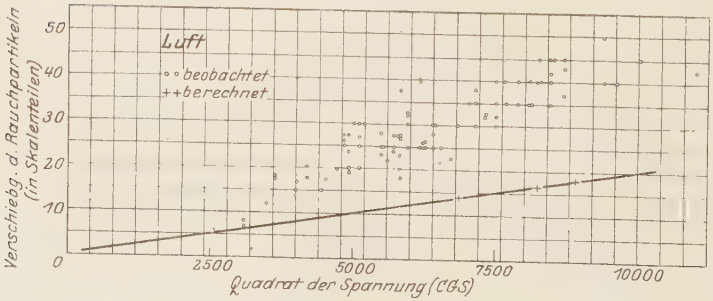

Fig. 6.

fehler erklären zu können; denkbar wäre, daß es sich hier auch um eine prinzipielle Abweichung handelt.

Berechnet man aus den gemessenen Werten das elektrische Moment von SO_2, so ergibt sich ein Wert der Größenordnung, wie ihn Frivold auch gefunden hat; es wird im Mittel $\mu = 1{,}7 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{cm}^{5/2}\,\mathrm{g}^{1/2}\,\mathrm{sec}^{-1}$, während Frivold auf einen Wert von $\mu = 1{,}83 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{cm}^{5/2}\,\mathrm{g}^{1/2}\,\mathrm{sec}^{-1}$ kommt.

C. Luft, Stickstoff, Sauerstoff. Auch bei diesen Gasen, die keine „fertigen“ Dipole besitzen, ist der Elektrostriktionseffekt nachgewiesen und gemessen worden. Der Effekt ist hier natürlich viel kleiner, etwa zehnmal so klein wie bei SO_2. Für alle drei Gase ergibt sich eine ungefähr gleich große Volumenkontraktion, wie die Figuren 6, 7 und 8 ergeben. Es zeigt sich auch wieder die gleiche systematische Abweichung, wenn sie auch nicht so groß ist wie bei CO_2.

Man kann genau so wie bei CO_2 den Wert des Korrektionsgliedes ε_1 ausrechnen und dann die theoretische Kurve berechnen. Dabei ergibt sich für ε_1 der Wert: bei Luft $\varepsilon_1 = 0{,}513 \cdot 10^{-6}$, bei Stickstoff $\varepsilon_1 = 0{,}650 \cdot 10^{-6}$, bei Sauerstoff $\varepsilon_1 = 0{,}482 \cdot 10^{-6}$[1]). Die mit diesen Werten ausgerechneten theoretischen Kurven sind in die Fig. 6, 7, 8 eingetragen; die beobachteten Werte gruppieren sich recht gut um die berechneten Kurven. Extrapoliert man hier auf Werte unter 12000 Volt und versucht das Moment zu berechnen, so erhält man Werte, die innerhalb der Fehlergrenze von Null nicht abweichen.

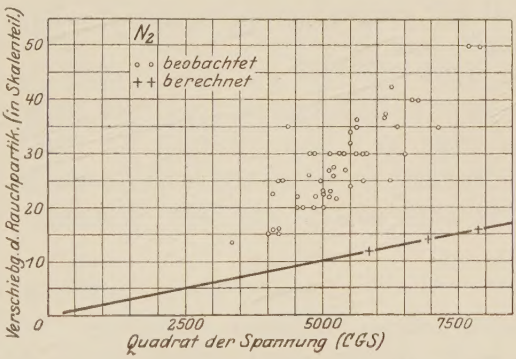

Fig. 7.

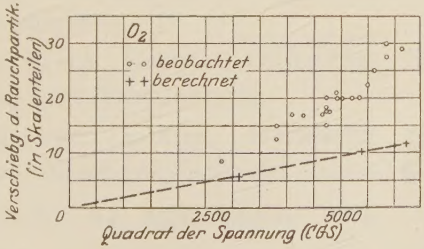

Fig. 8.

Zusammenfassung.

Es werden quantitative Messungen der Elektrostriktion an CO_2, SO_2, Luft, O_2 und N_2 ausgeführt. Für das elektrische Moment von CO_2 ergibt sich ein endlicher Wert von $\mu = 0{,}20 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{cm}^{5/2}\,\mathrm{g}^{1/2}\,\mathrm{sec}^{-1}$, für das von SO_2

[1]) Es erhebt sich natürlich die Frage, ob eine Möglichkeit besteht, die Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von der Feldstärke experimentell auf andere Weise zu messen. Da die Änderung der Dielektrizitätskonstante mit der Feldstärke verhältnismäßig groß ist, scheint es möglich, sie mit der sehr empfindlichen Schwebungsmethode, wie Herweg (ZS. f. Phys. **3**, 36, 1920) sie angibt, zu messen. Die Änderung müßte aber auch auf optischem Wege nachweisbar sein.

einer von $\mu = 1{,}7 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{cm}^{5/2}\,\mathrm{g}^{1/2}\,\mathrm{sec}^{-1}$. Für Spannungswerte über 15000 Volt werden Abweichungen von der Theorie festgestellt, die auf eine Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante vom elektrischen Felde zurückgeführt werden.

Die Anregung zu dieser Arbeit gab mir Herr Prof. Dr. Clemens Schaefer. Für seine vielfachen Ratschläge, sein förderndes Interesse, sowie die große Bereitwilligkeit, mit der er die Mittel zu dieser Arbeit beschaffte, bin ich ihm zu außerordentlichem Dank verpflichtet. Herrn Privatdozent Dr. Hermann Senftleben danke ich für mannigfach erteilten Rat. Herrn Institutsmechaniker Görs schulde ich Dank für seine Hilfe beim Bau der Apparatur.

Marburg (Lahn), Physikalisches Institut der Universität, Juli 1926.

Lebenslauf.

Ich, Joachim Ulrich Werner Kliefoth, ev. Konfession, bin am 29. VI. 1901 zu Hamburg als Sohn des Volksschullehrers Emil Kliefoth geboren. Die ersten 6 Schuljahre verbrachte ich auf der Volksschule. Ostern 1914 bis Ostern 1920 besuchte ich die Oberrealschule in Hamburg-Uhlenhorst, die ich mit dem Zeugnis der Reife verließ, um mich dem Studium der Pysik und Mathematik zu widmen. Ostern 1920 bis Oktober 1921 war ich an der Universität Hamburg immatrikuliert, Oktober 1921 bis Ostern 1922 in Marburg, das S. S. 1922 verbrachte ich in Göttingen, im Wintersemester 1922/23 war ich wiederum in Hamburg und von Ostern 1923 ab in Marburg.

Meine akademischen Lehrer waren:

in Hamburg: Baule, Blaschcke, Cassirer, Gottl-Ottlilienfeld, Hecke, Koch, Lenz, Möller, Nielsen, Ostrowski, Radon, Riebesell, Schottky, Schwassmann.

in Göttingen: Born, Frank, Grotrian, Oldemberg, Prandtl, Reich, von Traubenberg.

in Marburg: Bredt, von Dalwigk, Hartmann, Hensel, Köppe, Neumann, Schaefer, Schulze, Thiel.

Ihnen allen schulde ich aufrichtigen Dank.

Vorliegende Arbeit wurde in den Jahren 1923—26 im Marburger Physikalischen Institut ausgeführt.